

論文

GRC打込み型枠を用いた鉄筋コンクリートはりの
構造特性に関する実験的研究

村上 聖*・武田 浩二**・平居 孝之***

前田 孝一****・岸谷 孝一*****・三井 宜之*****

市村 信*****・加藤 信義*****

Experimental Study on Structural Characteristics of Reinforced Concrete Beam
with GRC Permanent FormKiyoshi MURAKAMI*, Koji TAKEDA**, Takayuki HIRAI***,
Koichi MAEDA****, Koichi KISHITANI***** , Yoshiyuki MITSUI*****,
Makoto ICHIMURA***** and Nobuyoshi KATO*****

1. はじめに

最近、鉄筋コンクリート(以下、RCと略記する)施工の自動化・省力化の1つとして、在来の合板型枠に替わり薄肉の高強度プレキャストコンクリートを用いた打込み型枠の実用化が進められている^{1)~5)}。打込み型枠工法の普及によって、ラワン合板使用による熱帯森林資源の乱伐に対する地球環境問題対策、型枠工事における熟練工の激減に対する現場作業の合理化、躯体寸法精度の確保や耐久性の向上、仮設工事としての型枠の組立・撤去の簡略化に伴うコスト低減・工期短縮などの波及効果が期待されている。ここで、打込み

型枠とは、コンクリートの鉤型としての機能だけでなく(従来、このような型枠は、捨て型枠、永久型枠と呼ばれていた)、躯体の一部として断面設計に考慮されることを積極的に意図して用いられている用語である。

従って、打込み型枠に要求される性能は、型枠を構造用材(かぶり厚さ)に含めたときに在来RC部材と同等以上の耐力を有すること、耐久性・耐火性の観点から設計荷重レベルまで型枠材と後打ちのコンクリートとの付着面が剥離せず、十分な一体性を保つことである。そこで、本研究では、高強度のガラス繊維強化セメント(GRC)を打込み型枠材として用いたRCはりとは在来の合板型枠によるRCはりの曲げ載荷試験を行い、主として上記の構造的観点について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

GRCの使用材料及び調合を、それぞれ表-1, 2に示す。繊維には、繊維長25mmの耐アルカリ性ガラス繊維を用い、繊維は外割重量で3%を混入した。GRCの混練には、容量30リットルのオムニミキサーを使用し、混練手順は、表-3に示すとおりである。なお、ブ

平成7年7月10日受付

*助教授 工博 建築学科

**大学院生 工修 自然科学研究科

***教授 工博 大分大学工学部

****助教授 工博 千葉大学工学部建築学科

*****教授 工博 日本大学理工学部建築学科

*****教授 工博 建築学科

*****大学院生 工学研究科

*****旭硝子 GRC システム部(株)

表-1 GRC の使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
骨 材	砕砂 5号
混 和 材	マイクロナシリカ
混 和 剤	高性能減水剤 (ナリックス酸系)
繊 維	耐アルカリ性ガラス繊維 繊維長さ 25mm

表-2 GRC の使用割合

使用材料	重 量 比
セメント	100
骨 材	90
混 和 材	10
混 和 剤	3.5
混 練 水	80
繊 維	7

*繊維は、外割重量で5%
混入

レーンモルタル及び GRC のフロー値及び空気量の測定値を表-4 に示す。RC はりに使用したレディーミクストコンクリートは、表-5 の仕様を示すように、呼び強度が 210 の普通コンクリートで、スランプ及び空気量の測定値は、それぞれ 18.7 cm, 4.3% であった。また、鉄筋には主筋として SD295A, D22 を、あばら筋には SD295A, D10 を使用した。

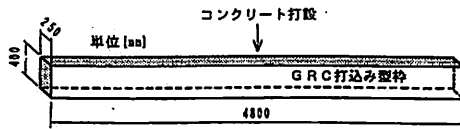


図-1 GRC 打込み型枠の外寸寸法及び形状

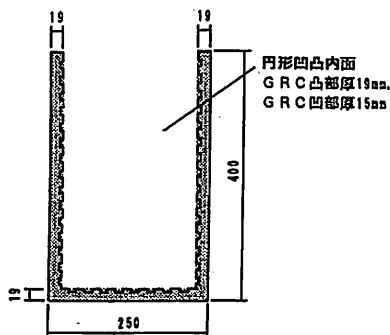


図-2 円形凸凹内面 U 字型一体成形成型枠

表-3 GRC の混練方法

①骨材+混和材	空練り	30秒
②+セメント	〜	30秒
③+(水+混和剤)	混練	120秒
70-値・空気量の70-値測定		
④+繊維	混練	30秒
GRCの70-値・空気量測定		

表-4 GRC のフロー値及び空気量

	70-値 (mm)	空気量 (%)
70-値測定	194	—
GRC	153	6.5

表-5 レディーミクストコンクリートの仕様

コンクリート 種 類	呼び強度 N/mm ²	指 定 スランプ (cm)	粗 骨 材 最大寸法 (mm)	モル 模範
普通	210	15	20	N

*W/C=58.5%, W=175kg/m³, C=300kg/m³, s/a=49.3%
減水剤使用

2.2 GRC 打込み型枠の作製

GRC 打込み型枠の外寸寸法及び形状は、図-1 に示すように幅 250 mm × 高さ 400 mm × 長さ 4800 mm の U 字型とし、後打ちコンクリートとの付着性能を高めるために、次の 2 種類の断面形状のものを 1 体ずつ作製した。

a. 円形凸凹内面 U 字型一体成形成型枠

図-2 に示すように、コンクリートと接する型枠内面にエアキャップにより円形の凸凹を設けた一体成形成の U 字型断面で、凹部及び凸部の GRC の厚さは、それぞれ 15 mm 及び 19 mm である。

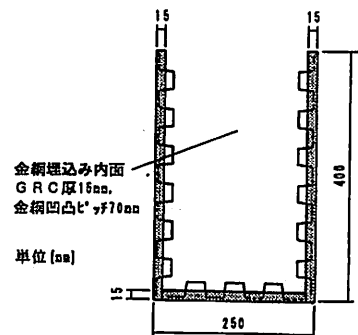


図-3 金網埋込み内面 U 字型組立成形成型枠

b. 金網埋込み内面U字型組立成形型枠

図-3に示すように、型枠内面に凹凸に型押しした亜鉛ビキ亀甲金網を半分埋め込んだGRC平板(厚さ15mm)をU字型に組み立てたものである。

以上のGRC型枠は、GRC打設後材令21日まで現場シート養生を行った。

2.3 素材試験

a. GRC

圧縮試験には、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用い、圧縮応力—ひずみ曲線とポアッソン比を測定した。なお、縦ひずみ及び横ひずみの測定には、それぞれコンプレッソメーター及びゲージ長30mmのワイヤーストレインゲージを使用した。

直接引張試験には、幅40mm×厚さ10mm×長さ380mmのGRC工業会試験体とダンベル形状(加工長さ50mm、最細部分の幅20mm×長さ25mm)試験体の2種類を用い、引張応力—ひずみ曲線を測定し、引張比例限界強度と引張強度を求めた。なお、引張試験は、GRC工業会のアルミ板接着法に準拠し、両端支持間隔280mm、クロスヘッド変位速度3mm/minとし、ひずみの測定にはゲージ長30mmのワイヤーストレインゲージを使用した。また、曲げ試験には、幅50mm×厚さ10mm×長さ275mmのGRC工業会試験体を用い、3点曲げ載荷(スパン長さ225mm)、クロスヘッド変位速度3mm/minで、荷重—クロスヘッド変位曲線を測定し、曲げ比例限界強度と曲げ強度を求めた。これらの試験体は、500mm角の鋼製型

枠にGRCを打設・硬化後、所定寸法に切断、研削加工して作製した。

以上の試験体の養生方法と個数を表-6に示す。

b. レディーミクストコンクリート

圧縮試験には、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用い、圧縮応力—ひずみ曲線とポアッソン比を測定した。割裂引張試験には、圧縮試験と同一寸法の円柱供試体を用い、割裂引張強度を測定した。曲げ試験には、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を用い、3等分点曲げ載荷(スパン長さ300mm)により曲げ強度を測定した。

以上の試験体の養生方法と個数を表-7に示す。

c. 鉄筋

主筋、あばら筋各6体について引張試験を行い、下降伏点、引張強度及び破断伸びを測定した。

2.4 付着剝離試験

考案の2種類の断面形状のGRC打込み型枠とコンクリートの一体性を調べるために、ここでは簡便な付着剝離試験法として部分圧縮試験を行った。図-4に示すように、接合部分が凹凸内面及び金網埋込み内面のGRC板と全体がコンクリートの3種類について、部分圧縮試験を行い、図-5に示す位置でのコンクリート及びGRC表面のひずみを測定した。なお、ひずみの測定には、ゲージ長さ30mmのワイヤーストレインゲージを使用した。また、試験体の養生方法と個数を表-8に示す。

表-6 GRC試験体の養生方法と個数

養生方法	圧縮	引張	曲げ
20℃水中養生(材令21日)	3	—	—
現場封緘養生(材令21日)	3	各3	6
現場気中養生	3	—	—

*試験時まで気中

表-7 レディーミクストコンクリート試験体の養生方法と個数

養生方法	圧縮	引張	曲げ
20℃水中養生(材令21日)	3	3	3
現場封緘養生(材令21日)	3	3	3
現場気中養生	3	—	—

*試験時まで気中

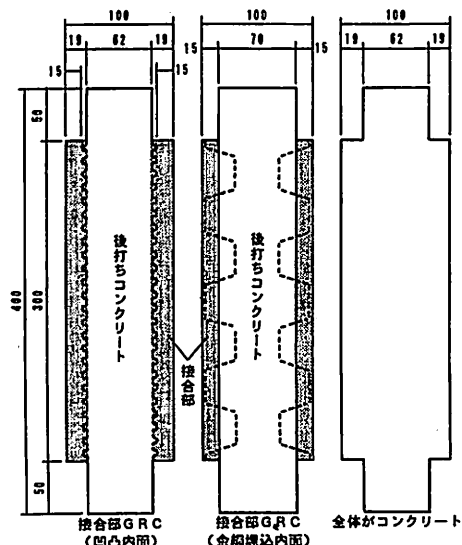


図-4 部分圧縮試験体の形状寸法

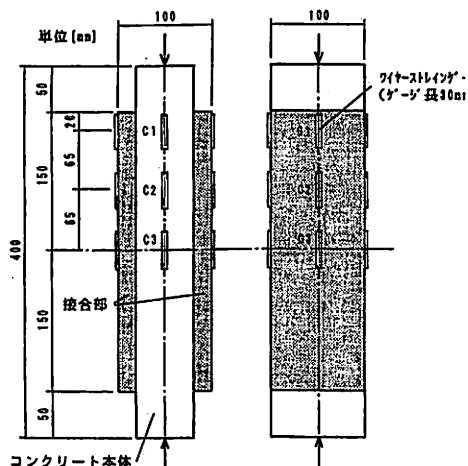


図-5 表面ひずみの測定位置

表-8 部分圧縮試験体の養生方法と個数

養生方法	接合部 GRC		全体がコンクリート
	凹凸内面	金網埋込	
20℃水中養生 (材令21日)	3	3	3
現場封緘養生 (材令21日)	3	3	3

*試験時まで気中

2.5 RC はりの作製

外形寸法が幅 250 mm × 高さ 400 mm × 長さ 4800 mm で、上記 2 種類の断面の形状の GRC 打込み型枠を用いた RC はりと、比較用として在来合板型枠による同一寸法の RC はりを一体ずつ作製した。図-6 に RC はりの配置図を示す。圧縮鉄筋は 2-D22 (圧縮鉄筋断面積, $a_c = 7.74 \text{ cm}^2$), 引張鉄筋は 2-D22 (引張鉄筋断面積, $a_t = 7.74 \text{ cm}^2$, 引張鉄筋比, $P_t = 0.91\%$, 複筋比, $\gamma = 1.0$), あばら筋は $\square D10 @ 200 \text{ mm}$ (あばら筋断面積, $a_w = 1.43 \text{ cm}^2$, あばら筋比, $P_w = 0.29\%$) とし、はり端部は上端及び下端筋ともにフック定着とした。なお、RC はりの公称断面寸法は、はり幅, $b = 250 \text{ mm}$, はりせい, $D = 400 \text{ mm}$, 圧縮縁・圧縮鉄筋間距離, $d_c = 60 \text{ mm}$, 有効せい, $d = 340 \text{ mm}$, かぶり厚さ 39 mm (GRC 厚を含む) である。

鉄筋は、高さを調整しながら、桟木に針金で吊り下げて配置し、スペーサー等は使用しなかった。コンクリートの締め固めには突き棒と棒状バイブレーターを使用し、型枠バイブレーター等は使用しなかった。また、RC はりは、材令 21 日まで現場シート養生を行い、その後試験時まで気中養生とした。

2.6 RC はりの曲げ載荷試験

図-7 に示すような載荷治具を用いて、RC はりの曲げ試験を行った。載荷方法は次のとおりである。

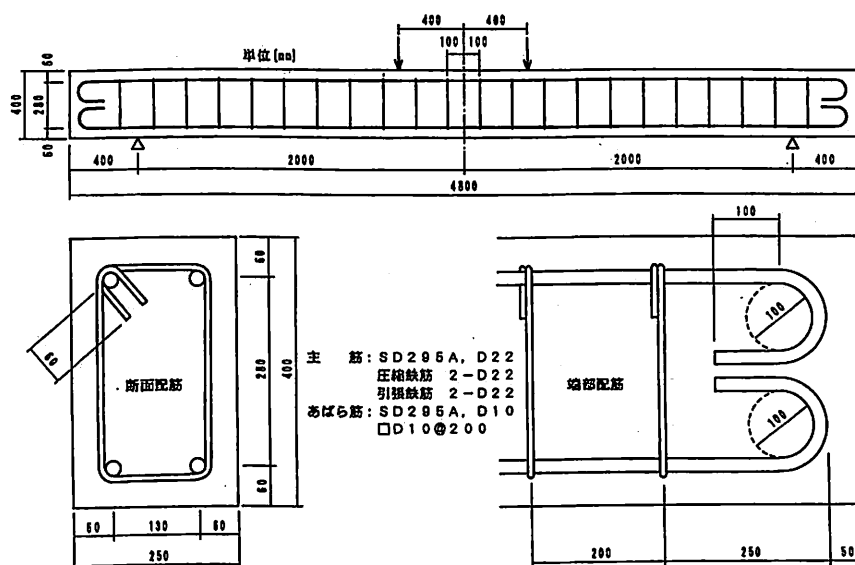


図-6 RC はりの配置図

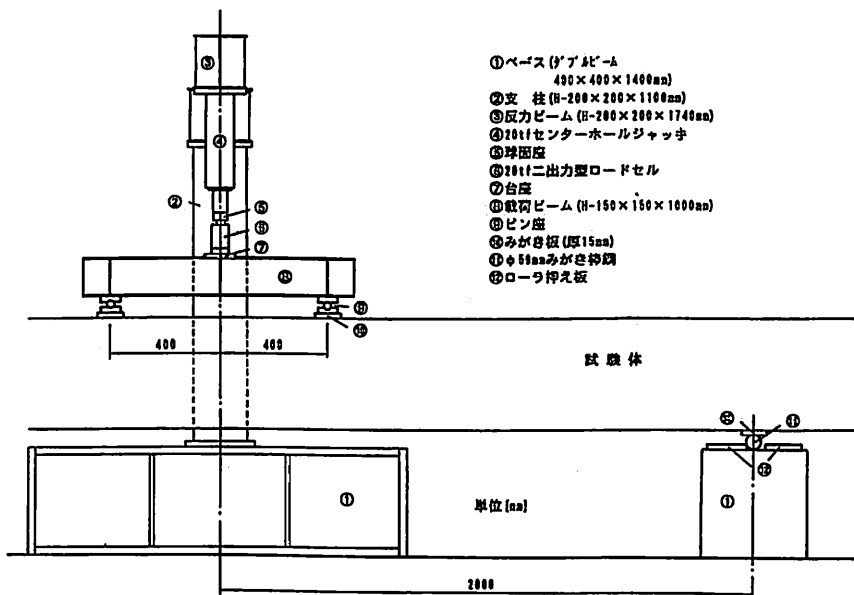


図-7 RC はりの曲げ載荷試験

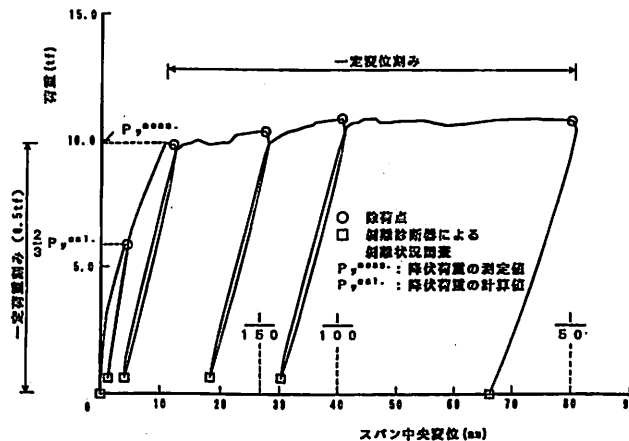


図-8 GRC 打込み型枠を用いた RC はりの X-Y レコグによる荷重—変位曲線

- 1) 載荷形式は4点曲げで、スパン長さ 4000 mm、載荷点間隔 800 mm とした。
- 2) 加力は、H 形鋼の反力梁に取り付けたセンターホールジャッキ (容量 20 tf) により行い、載荷は 20 tf 二出力型ロードセルにより検出した。また、偏心を避けるために、ジャッキ先端とロードセルの間に球座を、載荷点にはピン座を取り付けた。
- 3) 載荷点と支持点には、試験体との間にミガキ板 (厚さ 15 mm) を挟み、載荷点で GRC 型枠とコンクリートの両面に均等に荷重が加わるようにした。

また、支持点にはローラ ($\phi 50$ mm のミガキ棒鋼を使用) を用い、鋼棒とローラ押さえ板との間に発泡スチロールをかませて、水平拘束を除去した。また、載荷要領は次のとおりである。

- 1) 引張鉄筋降伏荷重の計算値 (後述) の 2/3 まで載荷後、一旦除荷。再び、実際の降伏荷重まで載荷後除荷。その後、スパン中央変位がスパン長さ (4000 mm) の 1/150 (約 27 mm) , 1/100 (約 40 mm) に達した時点でそれぞれ除荷し、最終的には変位がスパン長さの 1/50 (約 80 mm) に達し

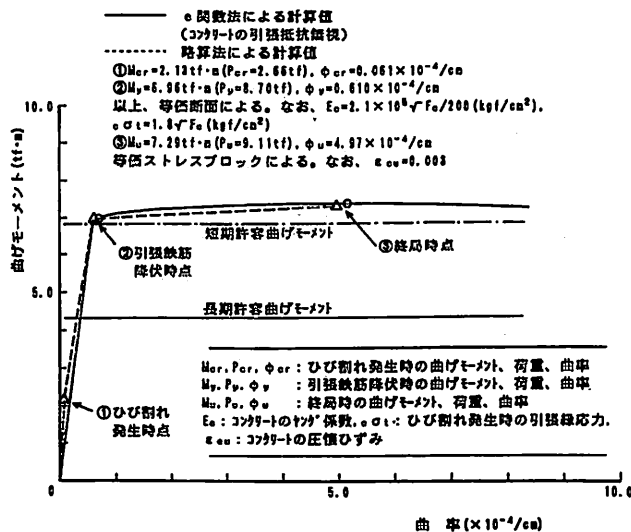


図-9 RC はり曲げモーメント-曲率関係の計算値

た時点で除荷して、試験を打ち切った。なお、X-Y レコーダーにより、荷重-スパン中央変位曲線を計測し、モニターとして用いた。その一例を、GRC (凸凹内面) 打込み型枠 RC はりについて図-8 に示す。また、載荷前と除荷ごとに後述の剝離診断器により GRC 型枠とコンクリートとの付着面の剝離状況を非破壊で調べた。

- 2) 降伏荷重に至るまでは、降伏荷重の計算の約 1/15 の荷重刻みで、降伏荷重以降は一定変位ごとにひずみ及び変位 (測定位置については後述) をデータロガーにより計測し、ひび割れや破壊性状を記録した。

b. RC はりの断面解析

予め、RC はりのひび割れ、降伏及び終局耐力の目安を得るために断面解析を行った。計算方法は、次の通りである。

e 関数法

- ①平面保持を仮定する。
- ②コンクリートの引張抵抗を無視する。
- ③コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線には、次式の e 関数を用いる。

$$\frac{\sigma}{f_c} = 6.75 (e^{\alpha \cdot \epsilon} - e^{\beta \cdot \epsilon})$$

ここに、 f_c : 圧縮強度 (ここでは、呼び強度 210 kgf/cm² を用いた)、 $\alpha = -0.812/\epsilon_{co}$ 、 $\beta = -1.218/\epsilon_{co}$ 、 ϵ_{co} : 圧縮強度時のひずみ (ここでは、RC 構造計算基準・同解説に基づき、 $\epsilon_{co} = 4.9 \times 10^{-4} f_c^{0.23} \times 1.15$ [乾燥

状態] により算定した)。

2) 略算法

①ひび割れ発生時点は、引張側のコンクリートを有効とした等価断面により計算した。なお、コンクリートのヤング係数は $E_c = 2.1 \times 10^5$ ($\gamma/2.3$)^{1.5} $\sqrt{f_c/200}$ (kgf/cm²)、引張強度は $f_t = 1.8\sqrt{f_c}$ (kgf/cm²) により算定した。

②降伏時点は、引張側のコンクリートを無視した有効等価断面により計算した。なお、鉄筋の降伏強度は 3000 kgf/cm² とした。

③終局時点は、ACI の等価ストレスブロック法により計算した。なお、コンクリートの終局ひずみは 0.003 とした。

図-9 に、曲げモーメント-曲率関係の計算結果を示す。図より、e 関数法と略算法による計算値の間に良い対応が得られ、降伏荷重の計算値として 8.7 tf の値が得られた。そこで、前述の降伏荷重、 P_y に至るまでの荷重刻みを (1/15) $P_y = 0.58 \text{ tf} \rightarrow 0.5 \text{ tf}$ 、1 回目の除荷点を (2/3) $P_y = 5.8 \text{ tf} \rightarrow 6 \text{ tf}$ とした。

c. 測定方法

ひずみ及び変位は、片側スパン半長の両側面を測定対象とし、図-10 に、ひずみ及び変位の測定位置を示す。測定法は、次のとおりである。

1) 荷重とスパン中央変位は、二出力型ロードセルと、二出力型変位計を用い、片一方をモニター用として X-Y レコーダーに記録した。

2) 主筋のひずみ測定には、ゲージ長さ 3 mm の単軸ワ

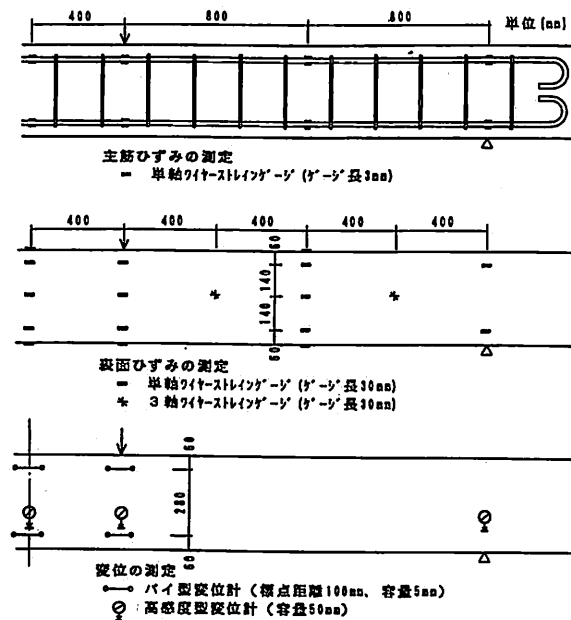


図-10 RC はりのひずみ及び変位の測定位置

イヤーストレインゲージを1箇所につき鉄筋の上下面に2枚、計16箇所に貼付けた。

3) GRC 型枠及びコンクリート表面の軸方向ひずみ測定には、ゲージ長さ 30 mm の単軸ワイヤーストレインゲージを1箇所につき1枚、計 27 箇所に貼付けた。また、せん断スパン内のひずみの測定には、ゲージ長さ 30 mm の3軸ワイヤーストレインゲージを1箇所につき1枚、計 4 箇所に貼付けた。

4) 純曲げ区間での GRC 型枠及びコンクリート表面の軸方向変位の測定には、バイ型変位計 (標点距離 100 mm、容量 2 mm) を1箇所につき1個、計 8 箇所に取り付けた。

5) スパンの中央、載荷点及び支持点の変位の測定には、変位計を1箇所につき1個、計 6 箇所に取り付けた。

以上のひずみ及び変位の測定値は、データロガーによりパソコンを介してフロッピーディスクに収録した。

d. GRC 打込み型枠の付着剝離状況調査

載荷状態での GRC 型枠とコンクリートの付着面の剝離状況を調べるために、タイル剝離診断器により非破壊調査を行った。ここで使用した剝離診断器の仕様を表-9に示す。本器は、打撃による振動音をマイクロフォンで検出・解析することにより、剝離状況を青、黄、赤の3色ランプで表示するもので、仕様では、それぞれの色に対して接着強度の範囲は、 4 kgf/cm^2 以上、 $1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $0 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。測

表-9 剝離診断器の仕様

適用条件 タイル モルタル 下地	大きさ50mm角以上、厚さ30mm以内 こて仕上げ、弾性塗装の無い壁面 RC構造			
検出深度	40mm以内			
診断目安	3色ランプ（LED）表示			
	ランプ表示色	青	黄	赤
	接着強度 (kgf/cm ²)	4以上	1～4	0～1
電源電圧	DC 12 V			
消費電力	約6 V A			
使用環境	0～40℃、R.H.85%以下			
寸法・重量	打撃部：70×65×570mm、1.1kg 診断部：44×94×180mm、0.6kg バッテリー：64×94×150mm、1.6kg			

定要領は、片側スパン半長両側に 100 mm 角のグリッドをひき、その線上に沿って剝離診断器を移動させ、ランプの色を記録した。そのときに、赤ランプを示した部分についてはその周辺を詳しく、また載荷試験終了

後は全面を入念に測定し、剝離部分の範囲を特定した。

以上の剝離診断器による非破壊調査の有効性を確認するために、載荷試験終了後に、はり側面でのコア採取による剝離状況の目視観察及び、建研式表面接着強度試験による GRC 型枠の接着強度の測定を行った。なお、コアの採取及び接着強度試験位置は、剝離診断器により赤、黄、青色を示した領域のそれぞれについて、3箇所ずつとした。また、コア寸法は直径 75 mm、深さ約 60 mm、接着強度試験のためのスリット寸法は 40 × 40 mm 角、深さ約 60 mm とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 素材試験結果

a. GRC

表-10, 11, 12 に、GRC の圧縮、直接引張及び曲げ試験結果をそれぞれ示す。GRC の圧縮強度は約

表-10 GRC の圧縮試験結果

発生方法	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	引張率 (%)
20℃水中発生	622	2.29×10^5	0.18
現場封緘発生	626	2.57×10^5	0.19
現場気中発生	625	2.54×10^5	0.21

表-11 GRC の直接引張試験結果

試験体形状	引張比例 限界強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	引張ヤング 係数 (kgf/cm ²)
GRC工業会案	16.7	55.4	3.34×10^5
ダンベル形状	35.2	74.6	3.49×10^5

620 kgf/cm²、曲げ強度は約 190 kgf/cm²で普通コンクリートに比べてかなり大きな値が得られている。ここで、試験体形状による引張強度の差異は、GRC 工業会試験体では最弱断面（アルミ板接着部分で破断したものもある）で破壊するのに対して、ダンベル形状のものは最細部分に破断が強制されるためであると考えられる。また、ヤング係数については、圧縮及び曲げヤング係数はほぼ同程度であるが、引張ヤング係数は圧縮及び曲げヤング係数の約 1.4～1.6 倍の高い値を示している。

b. レディーミクストコンクリート

表-13 にレミコンの圧縮、引張及び曲げ試験結果を示す。圧縮強度は、20℃水中及び現場封緘養生で呼び強度 210 kgf/cm²を満足し、割裂引張強度及び曲げ強度も両者の養生間では同程度の値が得られている。一方、現場気中養生の場合には、圧縮強度及びヤング係数は、20℃水中養生の場合のそれぞれ約 70%及び約 80%に低下している。

c. 鉄筋

表-14 に、鉄筋の引張試験結果を示す。

表-12 GRC の曲げ試験結果

曲げ比例 限界強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	曲げヤング 係数 (kgf/cm ²)
108	190	2.11×10^5

表-14 鉄筋の引張試験結果

	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	破断伸び (%)
主筋	330.6	491.6	31.1
あばら筋	347.0	509.2	22.9

*主筋、あばら筋ともに S D 2 9 5 A 使用

表-13 レディーミクストコンクリートの圧縮、引張及び曲げ試験結果

発生方法	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	引張率 (%)	強度時の ひずみ ($\times 10^{-3}$)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
20℃水中発生	225	2.22×10^5	0.26	2.19	23.1	33.2
現場封緘発生	240	2.19×10^5	0.21	2.13	20.3	37.6
現場気中発生	162	1.80×10^5	0.18	1.90	—	—

表-15 部分圧縮試験結果

a. 接合部がGRC(凹凸内面)

発生方法	ゲ-リ 貼付 位置	GRCの最大 ひずみ (G_{max}) (μ)	対応する コンクリートの ひずみ (C_{co}) (μ)	密着性 (G_{max}/C_{co})	対応する 荷重 (P_{co}) (tf)	最大荷重 (P_{max}) (tf)	剝離開始 荷重 V^* (P_{co}/P_{max})
20℃水中発生	G2, C2	2 2 5	3 6 8	0. 6 1	7. 3	1 1. 1	0. 6 6
	G3, C3	2 7 2	2 5 2	1. 0 8	7. 3		0. 6 6
現場封緘発生	G2, C2	1 9 7	2 8 3	0. 7 0	7. 2	1 3. 5	0. 5 3
	G3, C3	2 5 7	2 7 1	0. 9 5	7. 8		0. 5 8

b. 接合部がGRC(金網埋込内面)

発生方法	ゲ-リ 貼付 位置	GRCの最大 ひずみ (G_{max}) (μ)	対応する コンクリートの ひずみ (C_{co}) (μ)	密着性 (G_{max}/C_{co})	対応する 荷重 (P_{co}) (tf)	最大荷重 (P_{max}) (tf)	剝離開始 荷重 V^* (P_{co}/P_{max})
20℃水中発生	G2, C2	5 0 5	6 9 9	0. 7 2	1 2. 7	1 6. 0	0. 7 9
	G3, C3	5 8 0	1 0 6 8	0. 5 4	1 5. 0		0. 9 4
現場封緘発生	G2, C2	3 3 1	5 9 5	0. 5 6	1 1. 8	1 6. 2	0. 7 3
	G3, C3	4 1 7	7 5 4	0. 5 5	1 3. 7		0. 8 4

3.2 GRC付着剝離試験結果

表-15に部分圧縮試験結果を、図-11に一例として現場封緘発生の場合について試験体の最終ひび割れ及び破壊状況を、図-12に荷重とGRC及びコンクリート表面ひずみの関係を示す。

全体がコンクリートの試験体は、縦方向のひび割れの進展から加圧面端部の局部的圧壊により終局的破壊に至った。ひずみC2とG2またC3とG3は、最大荷重点近傍に至るまでほぼ一致し、接合部と本体が一体化していることを示している。なお、ひずみG1については、すべての試験体でほとんど0であるが、これは接合部の隅角部においては力学的に応力伝達がないためであり、剝離によるものではないと考えられる。

接合部がGRC(凹凸内面)の試験体は、接合部両端から付着面に沿ってひび割れが進展し、最終的にはほとんどの試験体で片側のGRC接合部が本体から完全に剝離した。ひずみC2とG2またC3とG3はともに最大荷重の約55%の荷重レベルまでほぼ一致し、その後G2またG3の接合部のひずみが減少しはじめ、

C2またC3の本体ひずみと逸脱分岐し、最大荷重点ではほぼ0になっている。これは、GRCの剝離を示し、GRC(凹凸内面)の場合には、ある荷重レベルまで高い密着性を保ち、その後接合部両端から生じた剝離が一気に中央部分まで進行し、接合部全体が剝離したものと考えられる。また、剝離面を観察すると、GRC面に凸に食い込んでいるコンクリート部分がすべて首切れており、付着面でコンクリートがずりせん断破壊したものと予想される。

接合部がGRC(金網埋込内面)の試験体は、接合部両端から付着面よりややコンクリート本体の内側に沿ってひび割れが進展し、加圧面端部の局部的圧壊により終局的破壊に至った。また、GRC(凹凸内面)の場合のように、GRC接合部全体の剝離は見られなかった。荷重-ひずみ曲線は、GRC(凹凸内面)の場合と傾向は概ね類似している。ただ、GRC(凹凸内面)の場合よりも密着性は小さいが、より高い荷重レベルで接合部両端から剝離が生じはじめ、その後荷重の増加を伴いながら徐々に中央部分に剝離が進行していく様

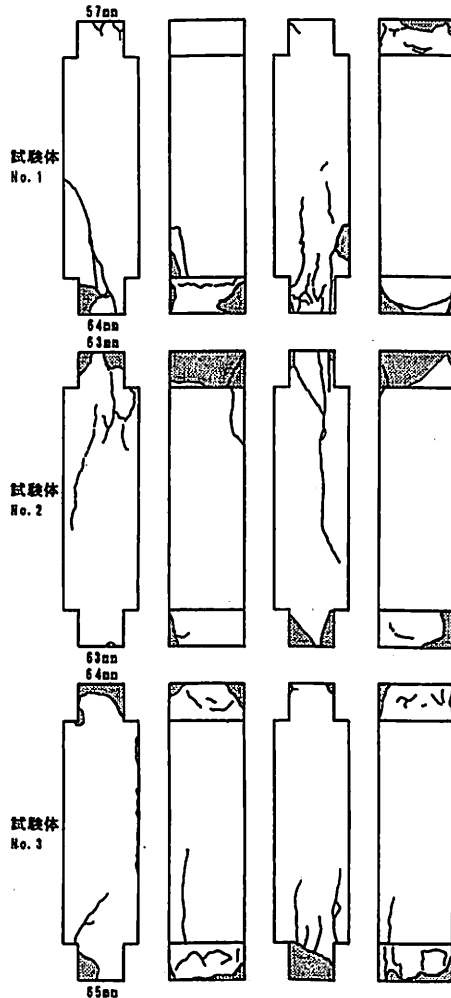


図-11 (a) 部分圧縮試験体の最終ひび割れ破壊状況 (全体がコンクリート, 現場封緘養生)

相が観察される。ここで、密着性が小さいのは、金網により GRC 面へのコンクリートの充填が阻害されたこと、また GRC 面が平滑なためにコンクリートとの付着強度が小さかったことなどが考えられるが、剝離拡大に対する金網の拘束効果がかなり大きいことが実験的に確認された。

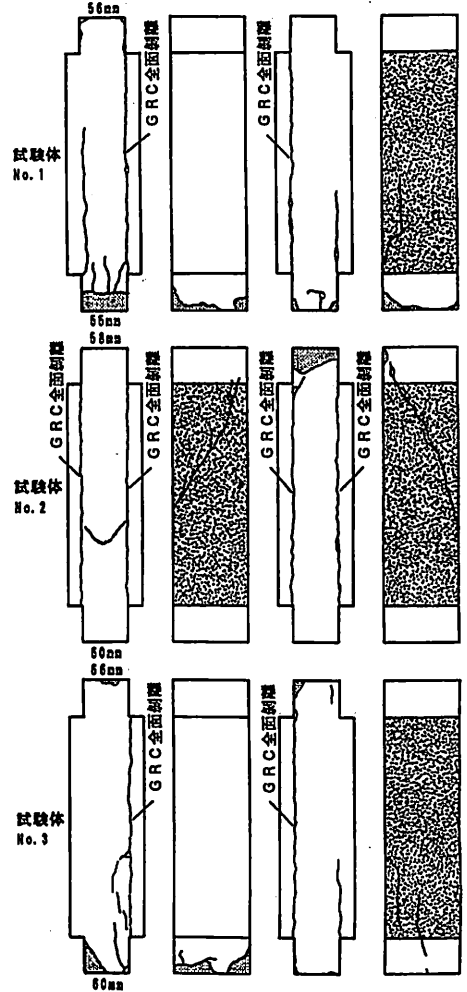


図-11 (b) 部分圧縮試験体の最終ひび割れ破壊状況 (接合部が凸凹内面 GRC 型枠, 現場封緘養生)

3.3 RC はりの曲げ試験結果

a. 最終的ひび割れ及び破壊状況

図-13 に、在来合板型及び GRC 打込み型枠による RC はりの最終的ひび割れ及び破壊状況を示す。終局的破壊は、すべてのはりについて圧縮側コンクリートの圧壊により生じた。GRC (凹凸内面) 型枠では、全ス

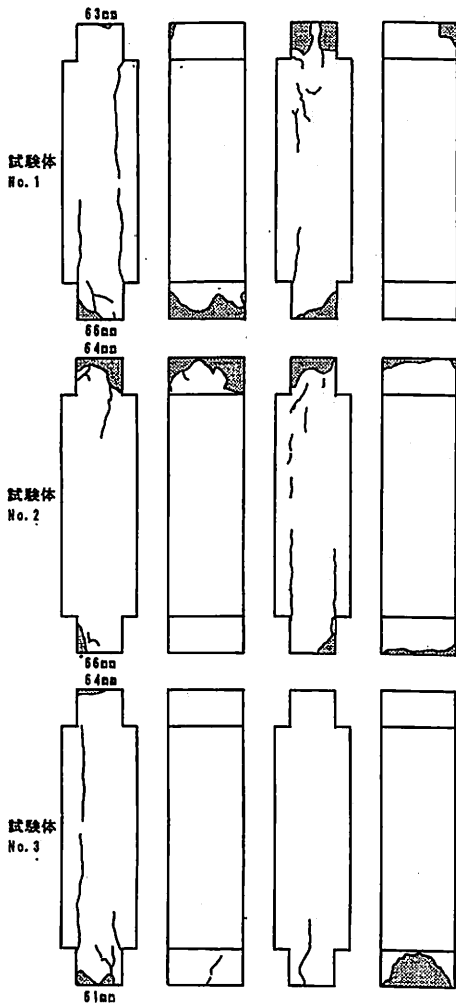


図-11 (c) 部分圧縮試験体の最終ひび割れ破壊状況 (接合部が金網埋込内面 GRC 型枠, 現場封緘養生)

パンにわたって圧縮縁で GRC 型枠とコンクリートの付着面に沿うひび割れが観察され, 終局時点では純曲げ区間の圧縮縁で顕著な剝離がみられた。一方, GRC (金網埋込内面) 型枠では, 終局時点でも目視による剝離は観察されなかった。また, 在来合板型枠による RC はりに比べて, GRC 打込み型枠による RC はりの方

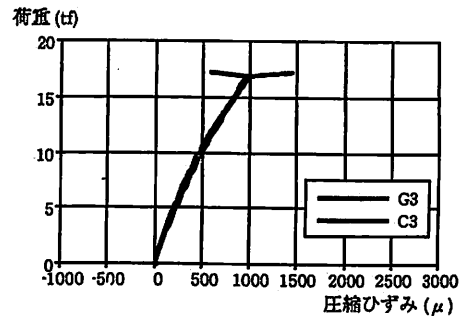
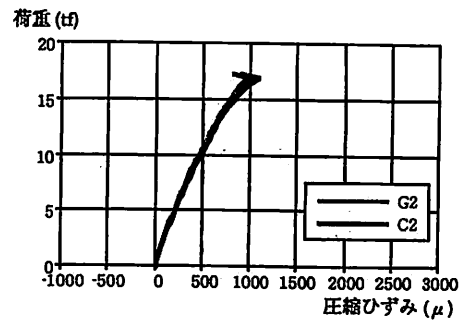
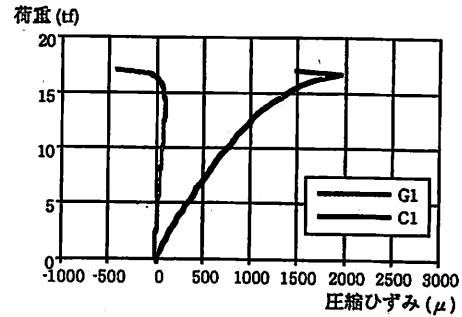


図-12 (a) 荷重—表面ひずみ関係の測定値 (全体がコンクリート, 現場封緘養生)

がひび割れの分散性がかなり小さくなっている。その要因として, GRC 型枠とコンクリートの付着面が剝離し, 内部のコンクリートのひび割れが表面に現れなかったということも考えられる。しかし, これに関しては後述の剝離状況の調査結果から, その可能性は小

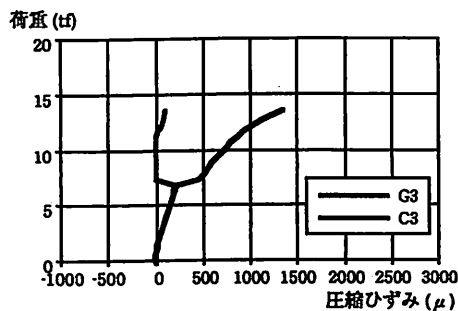
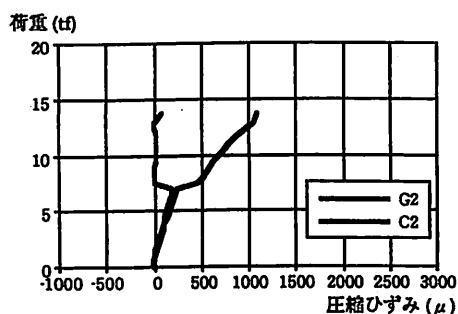
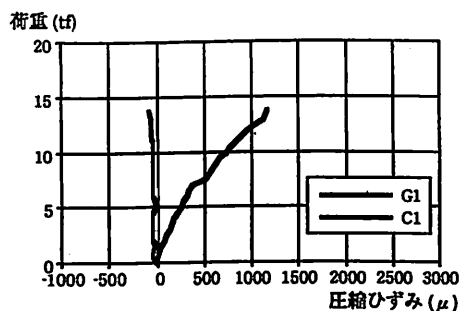


図-12 (b) 荷重—表面ひずみ関係の測定値 (接合部が凸凹内面 GRC 型枠, 現場封緘養生)

さく, GRC の高い引張強度に比べてコンクリートと鉄筋の付着強度が相対的に小さくなるためにひび割れの分散性が小さくなったものと考えられ, 繊維補強コンクリートを用いた RC はりの曲げ試験においても同様の傾向が観察されている⁶⁾。

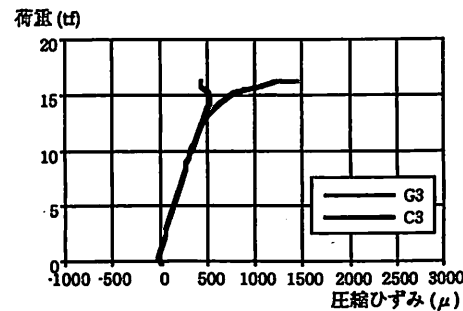
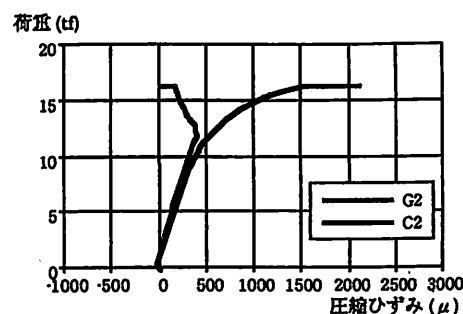
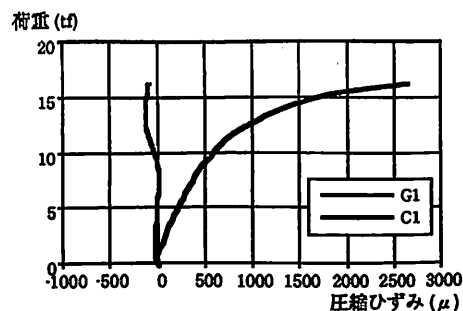
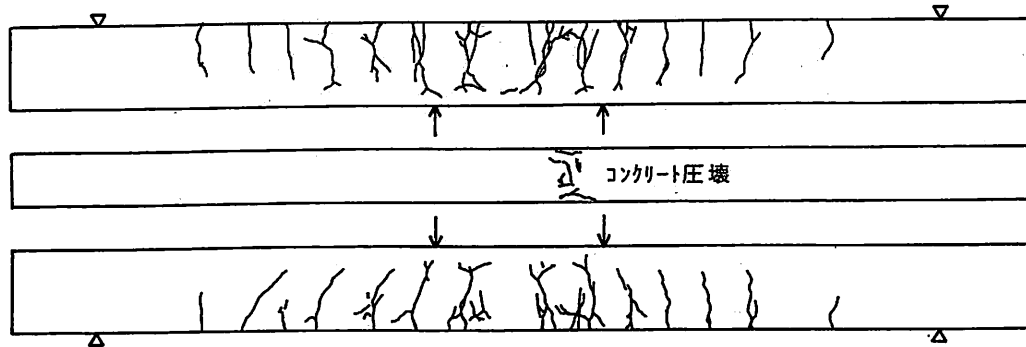


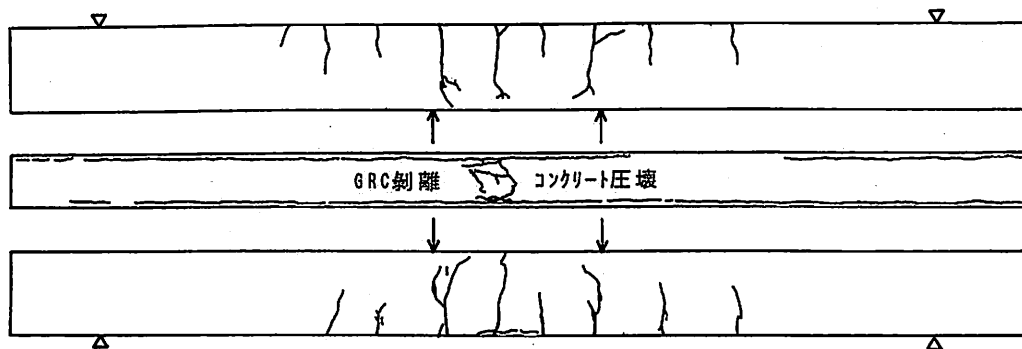
図-12 (c) 荷重—表面ひずみ関係の測定値 (接合部が金網埋込内面 GRC 型枠, 現場封緘養生)

b. 荷重—変位曲線と曲げ耐力

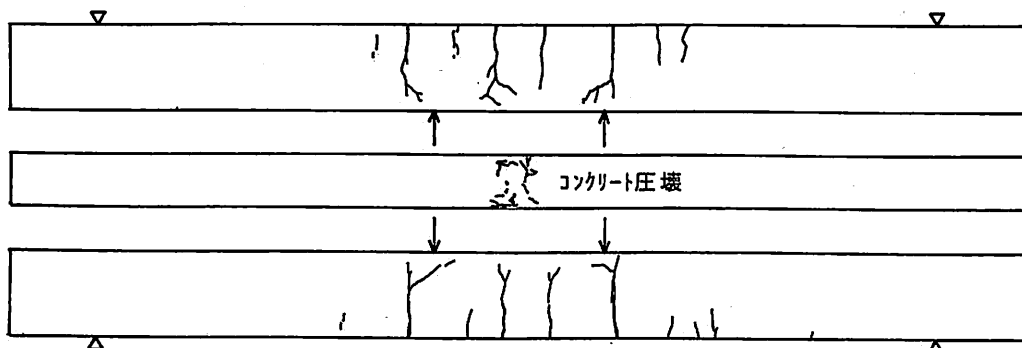
図-14 に, 在来合板型枠及び GRC 型枠による RC はりの荷重—スパン中央変位曲線の比較を示す。また, 表-16 に, ひび割れ荷重, 降伏荷重及び終局荷重の測定値を示す。なお, ひび割れ及び降伏荷重は, スパン



(1) 在来合板型枠 RC はり



(2) GRC (凹凸内面) 打込み型枠 RC はり



(3) GRC (金網埋込内面) 打込み型枠 RC はり

図-13 RC はりの最終的ひび割れ及び破壊状況

表-16 鉄筋コンクリートはりのひび割れ、降伏及び終局荷重の測定値

鉄筋コンクリートはり	ひび割れ荷重 (tf)			降伏荷重 (tf)			終局荷重 (tf)
	中央	載荷点	平均値	中央	載荷点	平均値	
在来合板型枠	2.02	2.02	2.02 (1.0)	9.00	9.86	43 (1.0)	11.04 (1.0)
GRC (凹凸内面) 型枠	3.98	3.00	3.49 (1.73)	9.99	9.54	9.77 (1.04)	10.86 (0.98)
GRC (金網埋込内面) 型枠	3.98	3.56	3.77 (1.87)	10.16	10.16	10.16 (1.08)	11.66 (1.06)

*()内の数値は、在来鉄筋コンクリートはりに対する比を示す

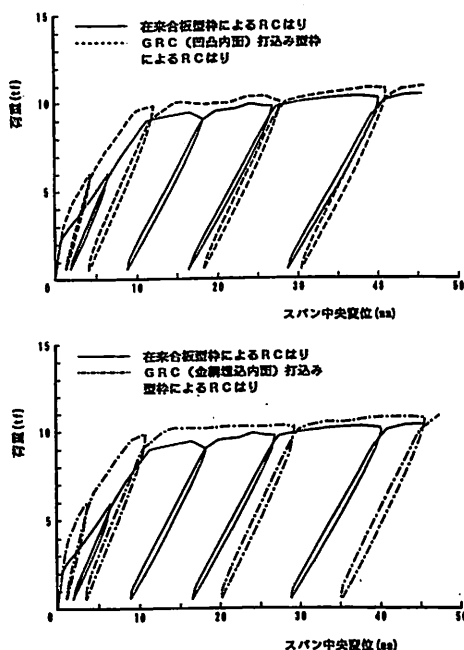


図-14 在来合板型枠及びGRC打込み型枠によるRCはりの荷重—変位曲線測定値の比較

中央及び載荷断面での荷重—鉄筋ひずみ関係から読みとった値の平均値を示している。これは、変位よりも鉄筋ひずみの方がひび割れ発生や鉄筋降伏に伴う変化が敏感なためである。これらの結果より、GRC打込み型枠によるRCはり、在来RCはりと同等以上の曲げ耐力を有していることが実験的に確認され、降伏及び終局荷重については在来RCはりとは大差はないが、ひび割れ荷重は約7～8割程度増加しており、高い引張強度を持つGRCの補強効果がみられる。

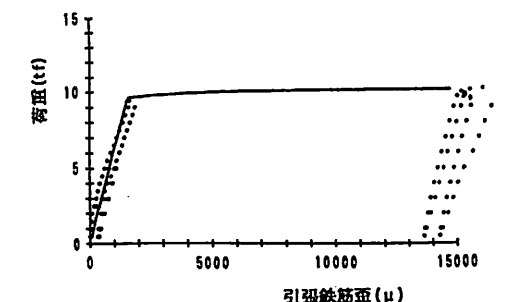
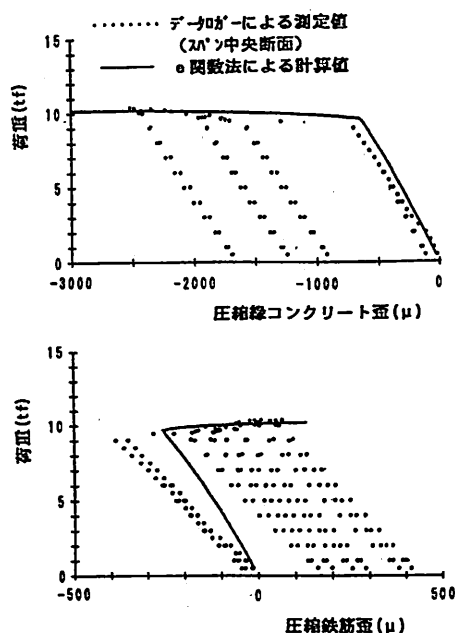


図-15 (a) 荷重—ひずみ関係の測定値と計算値 (在来合板型枠によるRCはり)

c. 荷重—ひずみ関係の測定値と計算値の比較

図-15 に、スパン中央断面における荷重とコンクリート圧縮縁ひずみ、圧縮鉄筋及び引張鉄筋ひずみの関係について、測定値と計算の比較を示す。なお、計算値は、前述の e 関数法によるもので、コンクリートの圧縮強度及び強度のひずみには、RC はりと同一養生条件の現場封緘養生の測定値を、主筋の降伏強度には測定値を用いた(それぞれ 240 kgf/cm^2 , 0.00213 , 3306 kgf/cm^2)。また、コンクリートの圧縮ひずみは 0.003 とし、コンクリートの引張抵抗や GRC 型枠は計算に考慮されていない。図より、計算結果は実験結果と良い対応を示している。

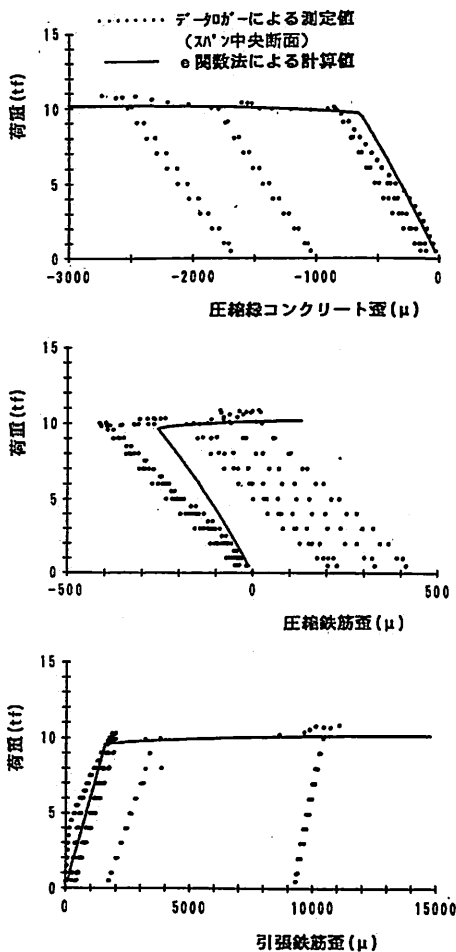


図-15 (b) 荷重—ひずみ関係の測定値と計算値 (凸凹内面 GRC 型枠による RC はり)

d. GRC 型枠とコンクリートの一体性

ここでは、鉄筋ひずみとコンクリートまた GRC 型枠表面ひずみの関係や、前述の剝離診断器を用いた剝離状況の非破壊調査により、GRC 型枠とコンクリートの一体性について検討した。

図-16 に、在来合板型枠及び GRC 型枠による RC はりについて、スパン中央、載荷点およびせん断スパン中央における荷重と主筋及びその真上のコンクリートまたは GRC 型枠表面ひずみの関係を示す。引張側では、ひび割れ発生時点まで引張鉄筋とその真上のコンクリートまたは GRC 型枠表面のひずみはほぼ一致し、一体性が保たれているが、ひび割れ発生後はコン

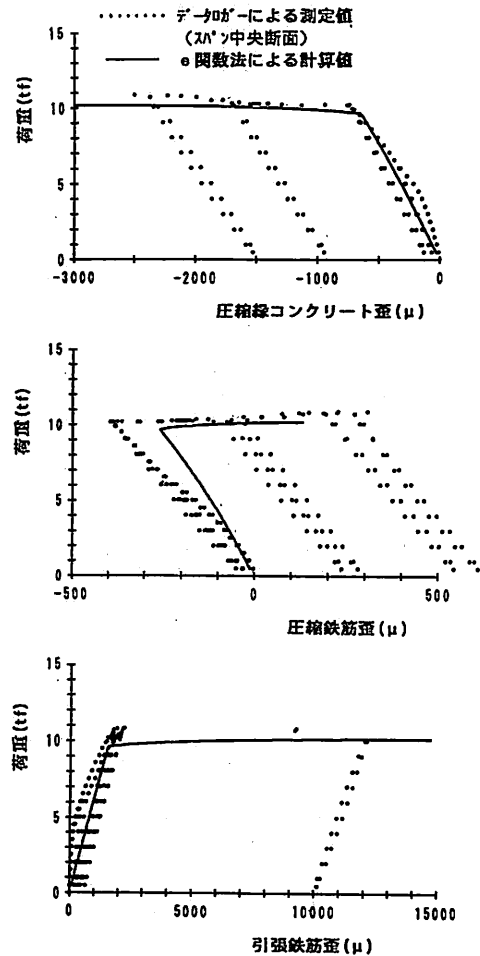


図-15 (c) 荷重—ひずみ関係の測定値と計算値 (金網埋込内面 GRC 型枠による RC はり)

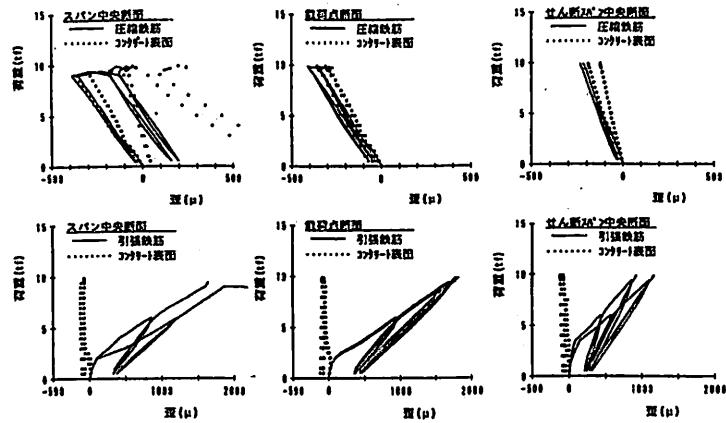


図-16 (a) 鉄筋及びコンクリート表面ひずみの関係 (在来合板型枠による RC はり)

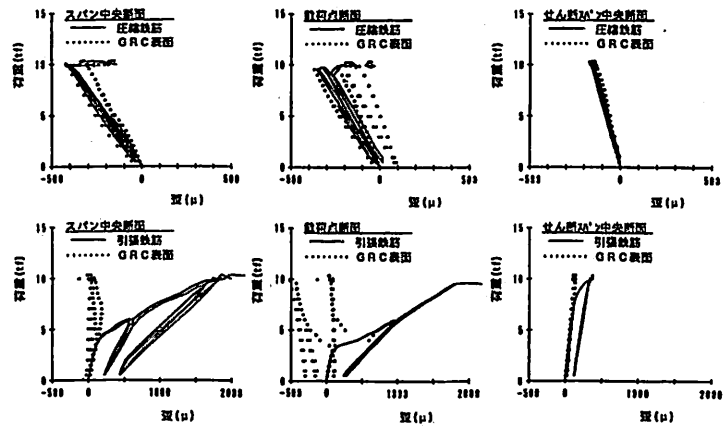


図-16 (b) 鉄筋及びコンクリート表面ひずみの関係 (凸凹内面 GRC 型枠による RC はり)

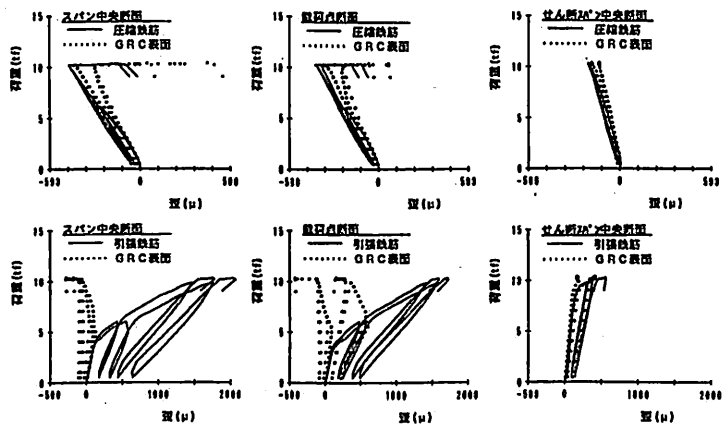


図-16 (c) 鉄筋及びコンクリート表面ひずみの関係 (金網埋込内面 GRC 型枠による RC はり)

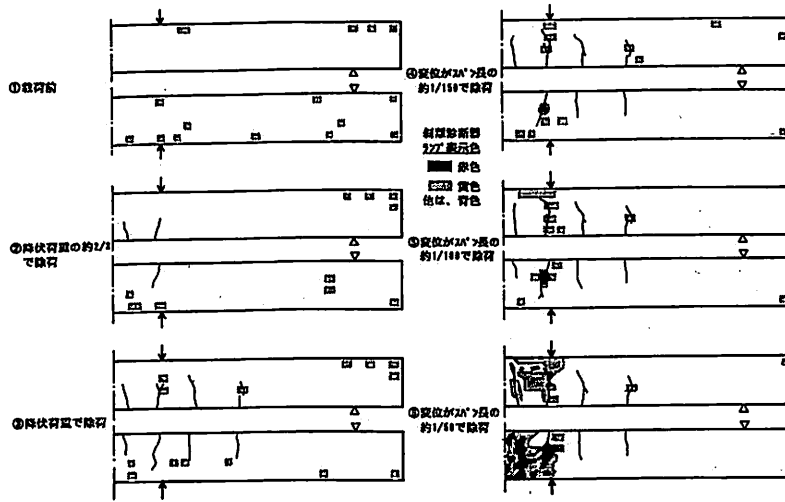


図-17 (a) 割離診断器による GRC 型枠の割離状況 (凸凹内面 GRC 型枠による RC はり)

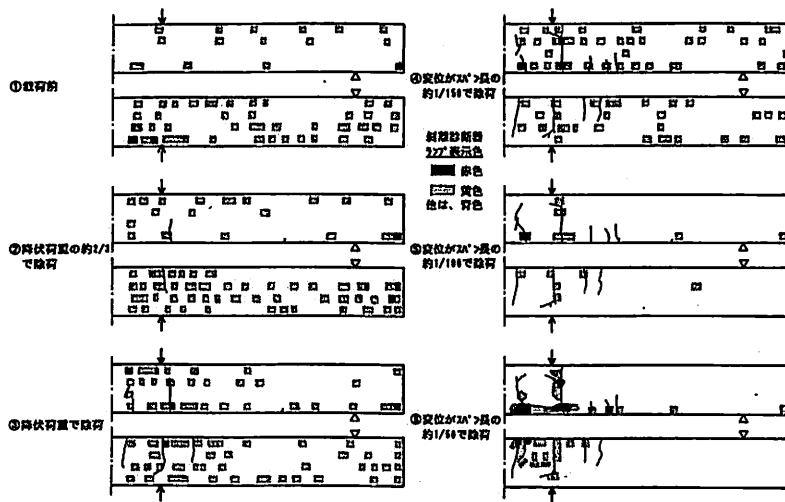


図-17 (b) 割離診断器による GRC 型枠の割離状況 (金網埋込内面 GRC 型枠による RC はり)

クリートまたは GRC 型枠にひび割れ間で除荷を生じるために、表面ひずみは急減している。また、GRC (金網埋込内面) 型枠では、ひび割れ発生後も一部 GRC 型枠表面ひずみが引張鉄筋ひずみに追従している場合も見受けられ、前述の部分圧縮試験結果の傾向と対応している。一方、圧縮側では、少なくとも降伏荷重点まで圧縮鉄筋とその真上のコンクリートまたは GRC 型枠表面のひずみはほぼ一致し、一体性が十分に保たれている。降伏荷重以降では、両者のひずみの間でずれを生じているが、変化の傾向は概ね類似している。以上の結果から、引張側ではひび割れ荷重点まで、圧

縮側では降伏荷重点まで GRC 型枠とコンクリートの一体性が十分に保たれていることが予想される。

図-17 に、GRC 打込み型枠による RC はりについて、載荷前、各除荷時点 (降伏荷重の約 2/3、約降伏荷重、変位がスパン長さの約 1/150、約 1/100、約 1/50) での割離診断器による割離状況を示す。図より、載荷前においても、黄色を示す部分が点在しており、特に金網埋込内面の GRC 型枠において顕著に現れている。これは、GRC 内面の凹凸の金網により型枠面へのコンクリートの充填が阻害されたためと考えられ、前述の部分圧縮試験結果において GRC (金網埋込内面) の密

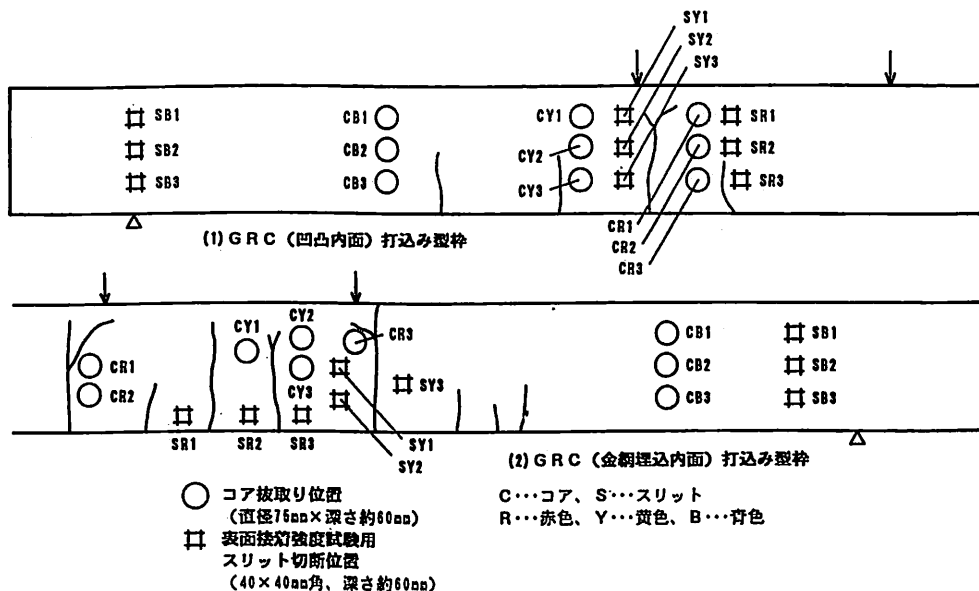


図-18 コア抜き及び表面接着強度試験用スリット加工位置

着性がGRC (凸凹内面) よりも小さかったことに対応している。しかし、載荷状態において降伏荷重点まで新たな剝離の拡大はほとんどみられない。一方、降伏荷重以降の変形の大きい範囲では、純曲げ区間で発生・進展したひび割れの近傍に赤色を示す剝離部分が形成され、それが核となって次第に剝離部分が周辺に広がって、行く様子が観察される。また、コンクリートの圧壊が生じる終局時点において、GRC (凸凹内面) 型枠では、剝離部分が純曲げ区間全体に広がっているのに対して、GRC (金網埋込内面) 型枠では、剝離部分は引張縁近傍のひび割れ周辺の狭い範囲に集中しているだけで、剝離拡大に対する金網の拘束効果が十分にみられる。これは、前述の部分圧縮試験結果と良い対応を示している。以上の結果から、少なくとも降伏荷重点まではGRC型枠とコンクリートの一体性が十分に保持されており、ひび割れ近傍においてもGRC型枠とコンクリートの付着面は剝離することなく一体化していることが予想される。

e. コア抜き及び表面接着強度試験結果

ここでは、載荷試験終了後にはり側面から抜き取ったコアの目視観察とGRC型枠の表面接着強度試験を行い、前述の剝離診断器による剝離状況の非破壊調査結果の妥当性について調べた。図-18に、コア抜き及び表面接着強度試験のためのスリット加工位置を示す。なお、コア抜きおよびスリット加工位置は、剝

離診断器により赤、黄、青色を示した領域で各3箇所ずつとした。

表-17に、赤、黄、青色を示した領域で抜き取ったコアの目視による観察結果を示す。GRC (凹凸内面) 型枠の場合、赤色の領域ではすべてGRC型枠がコンクリートから剝離しており、型枠面に凸に食い込んだコンクリートが全面首切れていた。黄色の領域では3体中2体についてGRC型枠が全面剝離していたが、残りの1体については見た目は健全であり、型枠とコンクリートの付着面にひび割れ等の異状は観察されなかった。青色の領域では、3体中1体について、GRC型枠が全面剝離していたが、残りの2体は健全であった。一方、GRC (金網埋込内面) 型枠の場合、赤色の領域ではGRC型枠がすべてコンクリートから剝離しており、その状況は、ちょうどコンクリートに埋込まれたアンカーボルトの引き抜けに類似し、金網部分でコンクリートがコーン状に剝離していた。黄色の領域では、3体とも型枠とコンクリートの付着面にひび割れ等の異状はみられず、見た目は健全であった。同様に、青色の領域でも3体とも健全であった。以上の結果から、剝離診断器による青色 (健全)、黄色 (剝離の危険性あり)、赤色 (剝離) の判定と、コアの抜き調査結果とは定性的にほぼ妥当な対応を示しているものと考えられる。

表-18に、赤、黄、青色を示した領域で行われた表

表-17 鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験後のコア抜き調査結果

GRC(凹凸内面)型枠			GRC(金網埋込内面)型枠		
コア記号	GRC剥離の有無	目視による観察結果	コア記号	GRC剥離の有無	目視による観察結果
CR1	全面剥離	型枠内面に凸に食い込んだコアが全面首切れていた	CR1	全面剥離	金網部分でコアがコーン状に剥離
CR2	全面剥離	CR1に同じ	CR2	全面剥離	CR1に同じ
CR3	全面剥離	CR1に同じ	CR3	全面剥離	CR1に同じ、なお後打ちコアとコアも圧縮
CY1	全面剥離	型枠内面に凸に食い込んだコアが全面首切れていた	CY1	剥離無し	型枠とコアの付着面にひび割れは見られず見た目には健全
CY2	剥離無し	見た目には健全	CY2	剥離無し	CY1に同じ
CY3	全面剥離	CY1に同じ	CY3	剥離無し	CY1に同じ
CB1	全面剥離	型枠内面に凸に食い込んだコアが全面首切れていた	CB1	剥離無し	型枠とコアの付着面にひび割れは見られず見た目には健全
CB2	剥離無し	型枠とコアの付着面にひび割れは見られず見た目には健全	CB2	剥離無し	CB1に同じ
CB3	剥離無し	CB2に同じ	CB3	剥離無し	CB1に同じ

表-18 鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験後の表面強度試験結果

GRC(凹凸内面)型枠			GRC(金網埋込内面)型枠		
コア記号	接着強度 kgf/cm ²	接着強度試験状況	コア記号	接着強度 kgf/cm ²	接着強度試験状況
SR1	0	コア加工時点でGRC全面剥離	SR1	0	コア加工時点でGRC全面剥離
SR2	0	SR1に同じ	SR2	1.6	金網部分でコアがコーン状に剥離
SR3	0	SR1に同じ	SR3	1.1	SR2に同じ
SY1	3.6	型枠内面に凸に食い込んだコアが全面首切れてGRC剥離	SY1	11.1	金網部分でコアがコーン状に剥離
SY2	2.2	SY1に同じ	SY2	11.8	14'樹脂接着剤剥離
SY3	0	コア加工時点でGRC全面剥離	SY3	6.3	SY1に同じ
SB1	2.8	型枠内面に凸に食い込んだコアが全面首切れてGRC剥離	SB1	18.6	金網部分でコアがコーン状に剥離
SB2	4.2	SB1に同じ	SB2	20.0	SB1に同じ
SB3	5.4	SB1に同じ	SB3	7.6	SB1に同じ

面接着強度試験結果を示す。GRC(凹凸内面)型枠の場合、赤色の領域では、コアと同様にスリット加工時点でGRC型枠が全てコンクリートから剥離していた。黄色の領域では、3体中1体についてスリット加工時点で型枠が全面剥離していたが、残りの2体は付着し

ていた。青色の領域では3体とも付着していた。なお、接着強度試験の剥離状況は、型枠に凸に食い込んだコンクリートが全面首切れて剥離した。一方、GRC(金網埋込内面)型枠の場合、赤色の領域では、3体中1体についてスリット加工時点でコンクリートがコーン

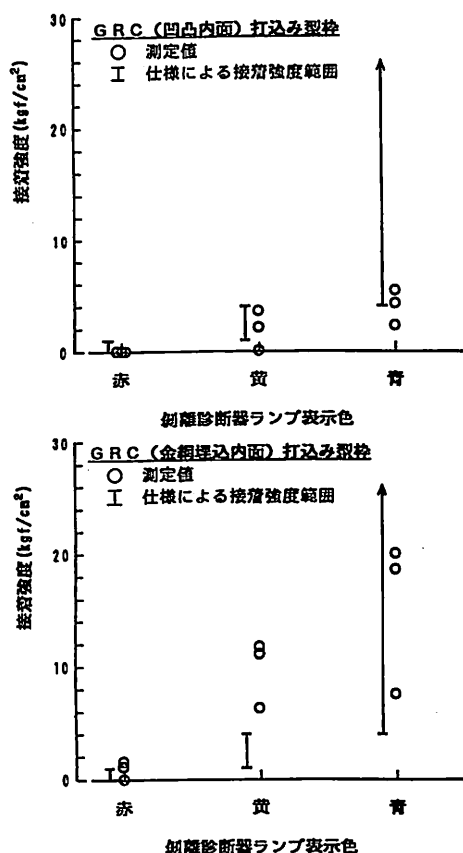


図-19 剝離診断器のランプ表示色と表面接着強度の測定値の対応

状に剝離していたが、残りの2体は付着していた。黄色及び青色の領域では、すべて付着していた。なお、接着強度試験では、黄色の領域の1体について型枠と40 mm 角の鋼板のエポキシ樹脂接着面で剝離した以外は、コンクリートがコーン状に剝離した。また、40 mm 角の接着面での埋込金網量のばらつきのために接着強度のばらつきが大きくなっている。図-19には、剝離診断器の各ランプ表示色と接着強度の測定値の関係を示す。なお、図中には、剝離診断器の仕様による各ランプ表示色に対応する接着強度の範囲を併記している。図より、赤、黄、青色の順に接着強度は増加し、その程度はGRC（凹凸内面）型枠よりもGRC（金網埋込内面）型枠の方が顕著に大きくなっており、GRCの剝離に対する金網の拘束効果がみられる。また、GRC（凹凸内面）型枠の場合、仕様の接着強度の範囲と接着強度の測定値の間に良い一致がみられ、測定値の平均

は、仕様の接着強度の範囲のほぼ下限値に対応している。一方、GRC（金網埋込内面）型枠の場合、赤色の領域での接着強度の測定値の平均は、仕様の接着強度の範囲内のほぼ上限値に対応しているが、黄色の領域ではすべての測定値が仕様の範囲を超えている。これは、接着強度試験における最終的な破壊が金網部分でのコンクリートのコーン状の剝離によるので、剝離診断器で黄色として感知される型枠とコンクリートの付着面の部分的な肌分かれは、それほど接着強度に影響しないためであると考えられる。以上の結果から、剝離診断器による剝離状況の判定は、接着強度について定量的にもほぼ妥当な結果を与えるものと考えられる。

4. ま と め

本研究では、高強度のガラス繊維強化セメント（GRC）を打込み型枠として用いた実大寸法の鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験を行い、打込み型枠に要求される構造的特性として型枠材を構造用寸法、即ちかぶり厚さに含めたときに在来の鉄筋コンクリートはりと同等以上の耐力を有すること、耐久性、耐火性の観点から、設計荷重レベルまで型枠材と後打ちコンクリートの付着面が剝離することなく十分な一体性を保つことの2点について実験的検討を行った。その結果として次のような知見が得られた。

- 1) GRC 打込み型枠による鉄筋コンクリートはりは、ひび割れ、降伏及び終局耐力について在来の鉄筋コンクリートはりと同等以上の耐力を有することが実験的に確認され、特にひび割れ耐力の増加に対して高い引張強度をもつ GRC の補強効果が顕著に認められた。
- 2) 短期設計用荷重にほぼ対応する降伏荷重レベルまで、GRC 型枠材と後打ちコンクリートの付着面は剝離することなく、十分な一体性を保持していることが、部分圧縮による付着剝離試験、鉄筋ひずみと型枠表面ひずみの対応、剝離診断器による剝離状況の非破壊調査、コア抜き取りによる目視観察、表面接着強度試験等の広範囲に及ぶ調査から実験的に確認された。

【謝辞】

本研究は、日本 GRC 工業会の委託による平成6年度 GRC 打込み型枠調査・研究委員会（委員長 平居孝之）における調査・研究の一環として行われた実験の一部を取りまとめたものであり、関係各位の皆様

深く謝意を表します。また、本実験を行うにあたっては、熊本大学工学部甲斐定夫技官をはじめ、建築材料・施工研究室の大学院生・卒論生の皆様に多大な協力を頂きました。重ねて感謝致します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：特集＊コンクリート技術の最前線，コンクリート工学，Vol. 33，No. 3，1995. 3.
- 2) 日本建築学会：新型枠技術の現状と課題，1993年度日本建築学会大会（関東）材料施工部門パネルディスカッション資料，1993. 9.
- 3) 日本建築学会，材料施工委員会，建築生産におけるロボット技術に関する小委員会：施工自動化への道程，1993年日本建築学会大会（関東）材料施工部門パネルディスカッション資料，1993. 9.
- 4) 小柳光生ほか：ガラス繊維補強コンクリート板を使用した打込型枠工法の開発について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 907-908，1991.
- 5) 浦野登志雄，村上 聖，三井宜之：鋼繊維補強コンクリートの引張特性とその寸法効果の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No. 442，pp. 1-11，1992，12.